УДК 539.4:538.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПАРАМЕТРАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА НА ИМПУЛЬСНОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ

Т.В. Фурса, А.П. Суржиков, Н.Н. Хорсов, К.Ю. Осипов, В.А. Зацепин

Томский политехнический университет
E-mail: fursa@tpu.ru

С использованием метода физического моделирования рассмотрен процесс механоэлектрических преобразований в слоистых композиционных материалах при их упругом ударном возбуждении. Установлена взаимосвязь параметров электрического отклика на импульсное механическое возбуждение с характеристиками ударного возбуждения, соотношением геометрических размеров и количеством слоев в слоистых композиционных материалах.

Широкое применение на практике композиционных материалов и их использование в различных конструкциях предъявляют к ним высокие требования по качеству и надежности. Для некоторых важных конструкций имеет большое значение точное соблюдение толщины слоев в слоистых композитах. Недостатки существующих методов заставляют искать принципиально новые методы контроля структурных характеристик конструкционных материалов. К наиболее перспективным физическим явлениям, пригодным для решения этих задач, следует отнести явление механоэлектрических преобразований. Суть явления заключается в преобразовании энергии механического возбуждения в энергию электромагнитного поля на структурных неоднородностях и дефектах в композиционных диэлектрических материалах. Существующие акустические методы не позволяют надежно определять структурные характеристики композиционных систем, состоящих из материалов с близкими значениями волновых акустических сопротивлений. Поэтому, в рамках данных исследований сделана попытка оценки структурных особенностей в слоистых композитах с близкими значениями волновых сопротивлений компонентов, используя явление механоэлектрических преобразований.

Для решения этой задачи были изготовлены физические модели слоистых композиционных материалов, состоящих из цемента и алебастра, волновые акустические сопротивления которых различаются приблизительно в 1,3...1,4 раза. Было изготовлено несколько двухслойных композитов с различной толщиной слоев и моделей с различным количеством чередующихся слоев из цемента и алебастра.

Образцы имели форму параллелепипедов. Слои в моделях располагались перпендикулярно большей плоскости, чтобы обеспечить наилучшие условия для регистрации электрического отклика из зоны адгезионного контакта, т.к. двойного электрического слоя, расположенного на границе слоев, параллельна приемному датчику.

Для импульсного механического возбуждения использовался стальной шарик массой 5 г, падающий с фиксированной высоты в центр образца. В качестве приемника электрической составляющей электромагнитного поля, возникающего при импульсном механическом возбуждении материалов, использовали дифференциальный емкостной датчик, одну из пластин которого располагали на расстоянии 2 мм от нижней поверхности образца. Другая пластина датчика для исключения (компенсации) внешних помех располагалась аналогичным образом под образцом-свидетелем, по которому удар не производился. Переменный электрический сигнал с емкостного датчика регистрировался с помощью осциллографа «PSC-500», совмещенного с ПЭВМ.

В процессе измерения регистрировалась также длительность ударного возбуждения. Это осуществлялось следующим образом. Через резистор на шарик по тонкой металлической нити подавался небольшой потенциал от заземленного источника напряжения. При ударе шарика о заземленную поверхность тонкой металлической подложки, накатанной на поверхность плоскости удара образца, в цепи возникал электрический ток, и одним из каналов осциллографа регистрировалось падение напряжения на резисторе, которое существовало до размыкания цепи при отлете шарика.

На первом этапе была исследована роль адгезионного контакта в генерировании электрического отклика из двухкомпонентных диэлектрических материалов. Для этой цели были использованы физические модели, представляющие собой двухслойные системы, изготовленные на основе цементного вяжущего и гипса. После окончания процесса твердения эти модели представляли собой параллелепипеды размером 5×5×10 см, состоящие из равных по размеру 5×5×5 см слоев цементного камня и алебастра, достаточно надежно связанных друг с другом силами адгезионного взаимодействия. Кроме того, были изготовлены образцы цементного камня и алебастра таких же размеров, как и слои в модели двухкомпонентной системы.

На рис. 1 приведены электрические отклики, зарегистрированные при ударном возбуждении описанных выше образцов.

Из рисунка видно, что электрический отклик из квазигомогенных материалов – цемента и алебастра существенно отличаются по величине и форме от сигнала из двухкомпонентного композита, изго-

товленного на основе этих же материалов. При ударном возбуждении цемента и алебастра регистрируется практически одиночный электрический сигнал, возникновение которого может быть связано с поверхностными явлениями в зоне контакта ударного элемента с поверхностью образцов [1]. При ударном возбуждении двухкомпонентного материала электрический отклик имеет значительно большую величину и представляет собой слабозатухающий колебательных процесс. Источником этого отклика является двойной электрический слой, всегда присутствующий на границе раздела, акустическое возбуждение которого и приводит к возникновению переменного электрического поля.

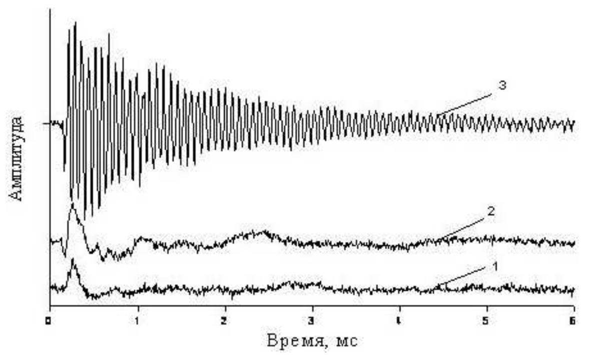


Рис 1. *Типичные электрические отклики из образцов: 1) цемента, 2) алебастра и 3) двухкомпонентной системы из цемента и алебастра*

Чтобы показать, что отличия в электрическом отклике не являются результатом существенных отличий в характере акустических волн, формирующихся в квазигомогенных материалах (алебастре и цементе) и композите были проведены измерения акустического сигнала при ударном возбуждении этих же образцов.

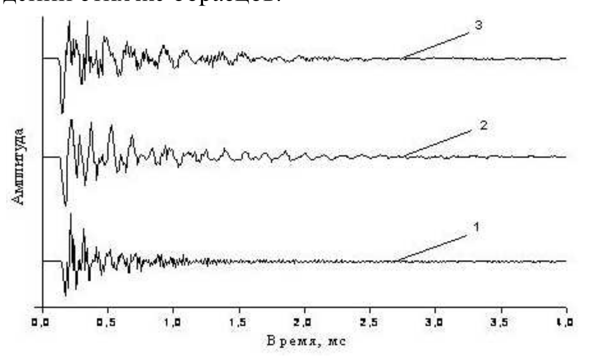


Рис. 2. *Типичные акустические сигналы, зарегистрированные при ударном возбуждении образцов: 1) цемента, 2) алебастра и 3) двухкомпонентной системы из цемента и алебастра*

Акустический сигнал измерялся с помощью широкополосного акустического датчика, изготовленного на основе ЦТС-керамики, помещенной в металлический корпус. Образец малой плоскостью устанавливался непосредственно на датчик, область контакта смазывалась литолом для осуществления хорошего акустического контакта, производилось ударное возбуждение с помощью того же стального шарика и регистрировался акустический отклик.

Из рисунка видно, что при ударном возбуждении как гомогенных, так и композиционных материалов регистрируются подобные акустические отклики, представляющие собой колебательный затухающий процесс, характерный для акустической картины, формирующейся в образцах из твердых материалов.

Следовательно, различия, наблюдающиеся в электрических откликах из этих же образцов, являются следствием наличия в композиционном материале источника, который отсутствует в гомогенных материалах, а именно, двойного электрического слоя, который всегда присутствует на границе двух разнородных материалов.

При исследовании двухслойных композитов было проведено измерение электрического отклика при ударном возбуждении в двух различных схемах: когда удар производился по цементу и по алебастру. Из-за различия упругих характеристик цемента и алебастра длительность удара, а, следовательно, и спектр механического возбуждения отличается.

Силовая характеристика импульса возбуждения была смоделирована, исходя из измеренной длительности ударного возбуждения по методике, изложенной выше. На рис. 3 представлена длительность возбуждения при ударе по алебастру. Она составляет порядка 120 мкс, а по цементному камню порядка 60 мкс.

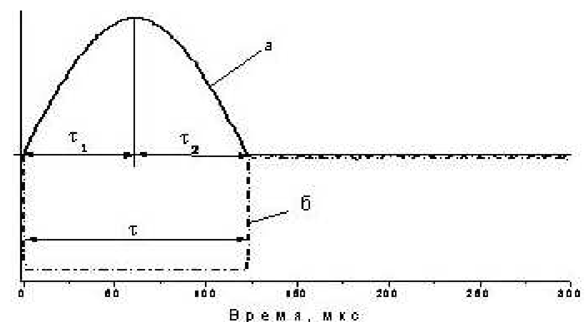
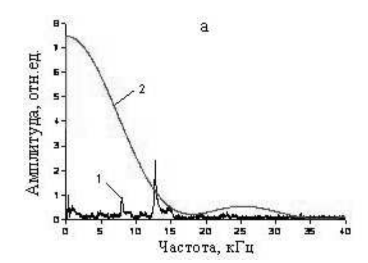


Рис. 3. *Процесс ударного возбуждения: а) силовая характеристика ударного возбуждения; б) импульс ударного возбуждения; τ – длительность ударного возбуждения; τ_1 – активный этап ударного возбуждения; τ_2 – пассивный этап ударного возбуждения.*

Процесс ударного возбуждения разделяется на два этапа. Во время первого (активного) этапа τ_1 контактная сила возрастает, а деформации в зоне контакта соударяющихся тел носят упругопластический характер, т.е. во время активного удара происходит нагружение тел; при этом центры инерции соударяющихся тел сближаются. Во время второго (пассивного) этапа τ_2 происходит разгрузка тел, т.е. восстановление упругих деформаций, а расстояние между центрами инерции соударяющихся тел увеличивается; контактная сила уменьшается, и как только она станет равной нулю, произойдет нарушение контакта соударяющихся тел.



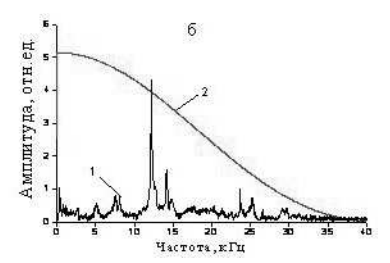


Рис. 4. *Спектры электрических сигналов (1) и механического возбуждения (2) для образца, состоящего из равных по толщине слоев цемента и алебастра, зарегистрированные при ударе по: а) алебастру, б) цементу*

Для оценочных расчетов аппроксимируем импульс возбуждения четвертями периода двух косинусоид, первая четверть периода одной (τ_1) соответствует возрастанию нагрузки на активном этапе нагружения, а четверть второй (τ_2) – процессу разгрузки. Из полученных силовых характеристик были рассчитаны спектры возбуждения (рис. 4 – кривые 2) для удара по алебастру – *а* и по цементу – *б*.

В результате различия упругих характеристик цемента и алебастра спектр электрического отклика имеет различия для одного и того же образца рис. 4.

Из рисунка видно, что при уменьшении длительности ударного возбуждения в спектре электрического отклика появляются более высокочастотные составляющие, в то время как положение основного максимума сохраняется. И чем шире спектр возбуждения, тем соответственно и шире спектр электрического отклика.

Проведенные исследования показывают, что характеристики возбуждения оказывают значительное влияние на параметры электрического отклика и должны учитываться при проведении любого сравнительного анализа электрических откликов.

Ранее нами было показано, что характеристики электромагнитного отклика на упругое ударное возбуждение зависят от структурных и механических характеристик материала [2, 3].

По нашим представлениям механизм механоэлектрических преобразований в композиционных материалах связан с изменением дипольного момента двойного электрического слоя на границе компонентов при прохождении через него акустических волн [4] и смещении зарядов двойного электрического слоя при деформации компонентов композита. А это значит, что изменение соотношения геометрических размеров компонентов должно привести к изменению параметров электромагнитного отклика из композиционных материалов. Кроме того, с изменением соотношения компонентов изменяется картина акустических колебаний в образцах, что также должно привести к изменению параметров электромагнитного отклика.

Чтобы исключить влияние характеристик возбуждения, сравним спектральные характеристики электрических откликов из образцов, имеющих различную толщину слоев, когда ударное возбуждение производится по одному и тому же материалу, в данном случае алебастру (рис. 5).

Из рисунка видно, что спектры откликов в различных по соотношению размера слоев алебастра и цемента двухкомпонентных композитах по форме различаются не очень значительно. Спектр имеет достаточно простой вид, в котором присутствует практически один спектральный максимум, соответствующий первой гармонике продольных акустических колебаний в направлении ударного возбуждения. При изменении соотношения размеров слоев меняется амплитуда этого максимума и происходит его смещение в более высокочастотную область в соответствии с изменением скорости звука в этих моделях. С увеличением толщины слоя композита (в нашем случае цемента), находящегося со стороны приемного электрического датчика, то есть с увеличением глубины расположения двойного слоя относительно точки приема, происходит уменьшение амплитуды основного спектрального максимума электрического отклика.

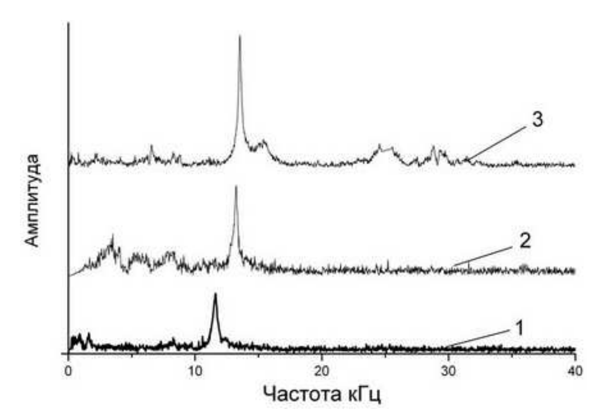


Рис. 5. *Спектральные характеристики электрических сигналов из двухслойных модельных композитов, состоящих из цемента и алебастра: 1) слой цемента 7 см, слой алебастра 3 см; 2) цемент 5 см, алебастр 5 см; 3) цемент 3 см, алебастр 7 см*

С точки зрения изучения процесса механоэлектрических преобразований в композиционных материалах большой интерес представляют слоистые композиционные материалы. Чтобы установить характер изменения параметров электрического отклика при увеличении количества слоев были изготовлены образцы с 2, 3 и 5 чередующимися слоями из цемента и алебастра.

На рис. 6 приведены результаты испытания моделей с различным количеством слоев.

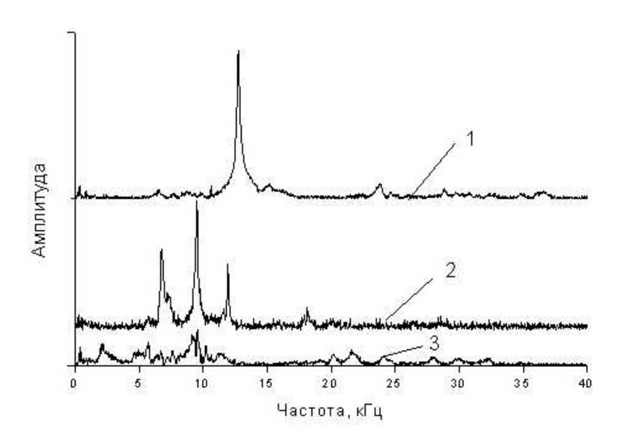


Рис. 6. *Спектральные характеристики электрических откликов из слоистых диэлектрических материалов: 1) двухслойного; 2) трехслойного; 3) пятислойного*

В слоистых материалах на границе компонентов имеются двойные электрические слои, которые имеют чередующееся направление полей диполей этих слоев. Известно, что в зависимости от соотношения диэлектрических проницаемостей на границе диэлектриков формируется двойной электрический слой, причем положительный заряд располагается со стороны материала с большей диэлектрической проницаемостью. С увеличением количества слоев наблюдается уменьшение амплитуды всех спектральных максимумов электрического отклика и увеличение их количества. Эти изменения могут быть связаны с суперпозицией электрических откликов механоэлектрических преобразований на разнесенных в пространстве двойных электрических слоях при прохождении акустической волны через образец и процессами переотражения акустических волн в этих материалах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fursa T.V. On One Mechanism of Mechanoelectrical Transformations in Impact-Excited Composites Based on the Cement Binder // Technical Physics. – 2001. – V. 46. – № 7. – P. 840–843.
2. Фурса Т.В., Гордеев В.Ф. Эффективность механоэлектрических преобразований на структурных неоднородностях бетона // Дефектоскопия. – 1999. – № 12. – С. 57–62.
3. Фурса Т.В., Осипов К.Ю. Влияние структурных особенностей композиционных материалов на параметры механоэлектрических преобразований // Известия вузов. Физика. – 2003. – № 11. – С. 61–65.
4. Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Батурин Е.А. Источники акустоэлектрических преобразований в бетонах // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69. – № 10. – С. 51–55.

УДК 539.3